

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS Y SU APLICACIÓN A LAS VINAZAS DE LA INDUSTRIA ALCOHÓLICA

Ing. Qco. Msc. Luis Alfonso Caicedo M.;

Ing. Qco. José Joaquín Fonseca;

Ing. Qco. Msc. Gerardo Rodríguez,

*Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia,
Santafé de Bogotá*

RESUMEN

La selección de un sistema de tratamiento de residuos debe seguir los criterios del proceso denominado BATEA (Mejor Proceso Disponible y Factible Técnica y económicamente). Debido a que su aplicación es difícil por no contar con parámetros objetivos de evaluación, se presenta un método que clasifica los criterios de evaluación en generales y específicos. Para la cuantificación de estos aspectos se emplean factores de ponderación como FQO, FCI, FTR, FD y el Factor de Aplicabilidad del Tratamiento (FAT). El método aplicado a la vinaza permite concluir que es la evaporación el mejor sistema de tratamiento para dicho proceso, mientras no se desarrollen otros sistemas o se aumente la tasa retributiva.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población y el desarrollo industrial han llevado las tasas de consumo de agua a valores muy superiores a los esperados, de acuerdo con las fuentes disponibles. Mientras el consumo se duplica cada 10 años, la cantidad de agua con que se cuenta por precipitaciones y fuentes naturales no aumenta y en algunos lugares disminuye cada vez más.

Este déficit creciente, sumado a los problemas ecológicos causados por los grandes volúmenes de residuos generados por nuestra sociedad, han creado la obligación inaplazable de tratar y reutilizar los residuos domésticos e industriales.

El primer paso para solucionar un problema de residuos es el de efectuar un control en la fuente, modificando los procesos de producción o haciendo una recirculación de aquéllos. No obstante, los volúmenes de efluentes generados siguen siendo tan grandes y contaminantes que se requiere siempre de un tratamiento posterior. Las investigaciones realizadas, sobre diferentes residuos, han conseguido desarrollar múltiples procesos de tratamiento que logran reducciones de la contaminación dentro de un amplio intervalo de eficiencia. Esta gama de alternativas ha traído grandes dificultades a los ingenieros ambientales en el momento de seleccionar un sistema de tratamiento de residuos; por cuanto en algunas ocasiones, el criterio de no sobrepasar un máximo exigido ofrece varias opciones, de las cuales se escoge una que obedece, en muchos casos, a criterios subjetivos.

El presente trabajo establece algunos factores para la evaluación de sistemas de tratamiento que intentan disminuir el grado de subjetividad que se tiene en la selección y lo aplica al caso de las vinazas originadas en las destilerías de alcohol.

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO

A través de los años, se han aplicado diferentes criterios para seleccionar un sistema de tratamiento de residuos, y en especial, los líquidos.

En los inicios del desarrollo industrial, cuando la población de las incipientes ciudades empezó a crecer rápidamente por las migraciones de las zonas rurales, y la infraestructura de los centros urbanos comenzó a ser insuficiente; el tratamiento de los residuos se hizo necesario para contrarrestar las enfermedades que se originaron por esta situación. Posteriormente, la escasez de fuentes de agua y la contaminación de los abastecimientos existentes, llevó a tener en cuenta el rendimiento de los procesos en relación con ciertos parámetros considerados críticos. Hoy en día, además del rendimiento de factores muy variados como DBO, DQO, etc., se tiene en cuenta en la selección, la disponibilidad tecnológica y el costo del tratamiento.

ECKENFELDER (en AZAD (1)) resumió los criterios para la selección de un sistema de tratamiento de residuos, así:

- Remoción del 85% de los sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno -DBO.
- Tratamiento corrientemente disponible BPTCA.
- Mejor proceso disponible y factible técnica y económicamente BATEA.
- Remoción del 100% de la contaminación.

La aplicación de uno u otro criterio obedece a la conciencia ecológica de la población y a la política desarrollada por los organismos gubernamentales encargados del control de la contaminación, que generalmente, corresponde a un punto de encuentro entre el desarrollo y la conservación.

En nuestro país, a pesar de regir el Decreto 1594 de 1984 que reglamenta las descargas industriales y que corresponde al primer criterio expuesto por

ECKENFELDER, debe buscarse una alternativa que estimule el desarrollo de innovaciones, que logre disminuir la contaminación a niveles que garanticen la conservación de las fuentes receptoras y que genere tecnologías propias y económicamente viables. Es decir, se debe implantar un criterio de BATEA donde se consiga, adicional al control ambiental, una interrelación entre Industria - Universidad - Estado que lleve a cuestionar, adecuar y desarrollar tecnología para cada problema.

A pesar de ser el criterio BATEA muy claro en su definición, la aplicación se hace difícil por la falta de pautas de evaluación que permitan comparar de una manera objetiva los tratamientos y por lo tanto decidir el más conveniente. En este trabajo, se presenta un método que trata de introducir aspectos cuantitativos de evaluación que disminuyan la incidencia subjetiva sobre la selección de un sistema de tratamiento de residuos.

PAUTAS PARA LA APLICACIÓN DEL CRITERIO BATEA

Para la aplicación del criterio BATEA en la evaluación de sistemas de tratamiento, debe tenerse en cuenta en primer lugar los aspectos generales relacionados con la disponibilidad de sistemas viables de tratamiento, y en segundo los aspectos específicos que cuantifiquen las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Aspectos generales: Tienen que ver con la disponibilidad y exigencias del sistema de tratamiento. Comprenden:

- Desarrollo técnico suficiente: El sistema o sistemas que se seleccionen deben ser altamente eficientes para justificar los estudios que optimicen las condiciones de operación.
- Instalación a corto plazo: Dentro de los sistemas disponibles pueden existir algunos que por su complejidad o poco desarrollo técnico no sean una solución industrial a corto plazo, esto limita su aplicación en casos donde se requiera una solución pronta.

La selección de los sistemas de acuerdo con estos aspectos, requiere una revisión muy amplia de los trabajos y tecnologías disponibles a nivel mundial sobre los residuos a tratar y de los estudios hechos en el país sobre el residuo en particular.

Aspectos específicos: Están relacionados con la bondad misma del sistema de tratamiento desde el punto de vista ecológico y económico. Estos aspectos se han agrupado en cinco factores de ponderación, asignándole a cada uno de ellos un porcentaje de contribución de acuerdo con su incidencia sobre la contaminación y el costo del tratamiento.

Los factores y su porcentaje que se resumen en la tabla 1 son:

Factor de contribución por remoción -FCR: Este factor se considera como uno de los más importantes y se le ha asignado un porcentaje relativo del 45%. Su función es cuantificar el impacto ecológico del tratamiento, evaluando la eficiencia de remoción en un parámetro de la contaminación como lo es la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La expresión que se presenta para su cálculo es de la forma exponencial y tiene presente que entre menor sea el valor final de la DQO mayor dificultad se va a encontrar para instalar un tratamiento. La ecuación propuesta es:

$$FCR = 45^x$$

donde x es la fracción de remoción de DQO y se define como:

$$X = (DQO\ inicial - DQO\ final) / DQO\ inicial$$

Factor de costo inicial - FCI: En un tiempo, la comunidad debía cancelar a través de impuestos el costo de la descontaminación sin hacer diferencia entre los mayores y menores contaminadores. El alto costo de los tratamientos y el aumento de la carga contaminante han hecho que se establezca el principio de Equidad, consistente en trasladar el costo al causante directo de la contaminación; esto ha llevado a cada planta industrial o municipio a instalar su propio sistema o pagar a través de impuestos el daño causado al ambiente. En nuestro país, donde la autofinanciación es la política imperante para la instalación de estos sistemas, un menor costo inicial implica una mayor factibilidad de instalación. Se ha establecido que el costo de un sistema de tratamiento está ligado directamente con el costo de la planta de producción, por lo tanto, se considera que para ser factible económicamente una inversión en descontaminación, ésta

Tabla 1. Factores para evaluación de los aspectos específicos de un sistema de tratamiento y sus porcentajes relativos.

Factor de Contribución por Remoción de DQO (FCR)	45%
Factor de Costo Inicial (FCI)	20%
Factor de Tasa de Retorno (FTR)	25%
Factor de Disponibilidad (FD)	10%
Factor de Aplicabilidad del Tratamiento (FAT)	100%

no puede ser mayor del 30% del costo de la planta. Valores superiores deben hacer pensar en un cambio del proceso de producción o un estudio económico más detallado para justificar una inversión mayor.

La expresión presentada para calcular este factor es entonces la siguiente:

$$F.C.I. = 25 \left[1 - \frac{M.T.}{0.3 M.P.} \right]$$

para: $MT \leq 0.3MP$

o $FCI = 0$ para $MT > 0.3MP$

donde: MT Costo del sistema de tratamiento en millones de pesos o dólares (según el sistema escogido)*

MP Costo de la planta

Para fijar los costos, de acuerdo con la nueva reglamentación fiscal que rige nuestro país la cual considera para efectos contables el valor actualizado, es recomendable tomar para los cálculos, el costo de las plantas en dólares.

Factor de tasa de retorno - FTR: Este factor relaciona los beneficios que trae a la empresa contaminadora la instalación de un sistema de tratamiento y el tiempo en el cual se recupera la inversión. Para inversiones en pesos en el año 1990 la tasa mínima de retorno fijada por el gobierno correspondió a 31.8%. Para inversiones en dólares este valor debe ser mayor al interés mínimo de depósitos (Prime Rate) que para junio de 1992 era del 8%, algo inferior al interés de la deuda externa que en ese año correspondió al

1.5% (2). Para este estudio, se tomaron los valores en dólares y se fijó una tasa mínima de retorno (T.M.R) del 10% que representa un tiempo para la recuperación de la inversión de aproximadamente 10 años.

La expresión para determinar el Factor de Tasa de Retorno será:

$$F.T.R. = 25 \left[\frac{T.R.T.}{T.M.R.} \right]$$

para $TRT < 10 : 6$

$$F.T.R. = 25$$

para $TRT > = 10$

$$T.R.T. = (B.A.S. + T.R.S.T. - T.R.C.T.) \frac{1}{C.T. + 1}$$

donde: T.R.T = Tasa de retorno total
T.M.R = Tasa mínima de retorno
B.A.S = Beneficios anuales por venta de subproductos
C.T. = Costo del sistema de tratamiento
T.R.S.T = Tasa retributiva anual sin tratamiento
T.R.C.T = Tasa retributiva anual con tratamiento

Para valores de FTR mayores de 25 se puede concluir que la inversión presenta tantas ventajas, que su selección podría obedecer a intereses diferentes a los ecológicos y por lo tanto, técnicas de evaluación económica más detalladas deberán aplicarse. Por esta razón, se asigna un máximo valor de 25.

Factor de disponibilidad: Cuantifica la disponibilidad de tecnologías en el país para instalar un sistema de tratamiento y la facilidad de operación del mismo. En razón a la dificultad para su cálculo se ha elaborado la tabla de evaluación que se muestra a continuación, donde se tienen en cuenta la disponibilidad de la tecnología en el país y la dificultad de operación que comprende tanto sistemas de análisis y control, como disponibilidad de personal calificado:

El mayor valor se asigna a las tecnologías ya conocidas e implantadas en el país, por cuanto esto implica experiencia en su manejo y disponibilidad de personal para su implementación y control. La di-

Tabla 2. Factor de disponibilidad para la evaluación de sistemas de tratamiento.

Tecnología disponible en el país y de fácil operación	8-10%
Tecnología disponible en el país y operación con grado medio de dificultad	6-8%
Tecnología disponible en el país y operación con alto grado de dificultad	4-6%
Tecnología no disponible en el país y fácil operación	1-2%
Tecnología no disponible en el país y operación con grado medio de dificultad	0-1%
Tecnología no disponible en el país y operación con alto grado de dificultad	0%

ferencia entre las tecnologías disponibles y no disponibles en el país busca fomentar la investigación y el desarrollo de nuevos sistemas de tratamiento.

Factor de aplicabilidad del tratamiento FAT:

Este factor nos permite la comparación entre los diferentes tratamientos y corresponde a la suma de los cuatro factores vistos anteriormente.

$$F.A.T. = F.C.R. + F.C.I. + F.T.R. F.D.$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN A LAS VINAZAS DE LAS DESTILERÍAS DE ALCOHOL

En primer lugar se deben tener en cuenta los aspectos generales relacionados con los procesos existentes y en segundo término los aspectos específicos.

Aspectos generales: De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada por CAICEDO (3) son muchos los sistemas de tratamiento que pueden ser aplicados a la vinaza y que van desde su uso como agua de riego, hasta ultrafiltración y osmosis reversible. Todos ellos presentan ventajas y desventajas que no permiten una selección fácil y única. Para nuestro país, donde las diecisiete destilerías existentes producen una contaminación equivalente a una población de cuatro millones de habitantes (CAICEDO (9)), se hace necesario instalar un sistema de tratamiento dentro del menor tiempo posible. Los métodos que podrían aplicarse a corto plazo serían:

- Calcinación

- Evaporación
- Producción de Proteína Celular
- Producción de Metano

Se descartan: El empleo como agua de riego por las características de la mayoría de nuestras destilerías que son dependientes y localizadas en las grandes ciudades. Los tratamientos aeróbicos o facultativos que no son recomendables por la alta carga contaminante de este residuo.

Aspectos específicos: Para la aplicación de los factores expuestos anteriormente, se tendrá en cuenta la información sobre remociones y costos dados en la literatura, ajustados a una planta de 80000 l/día de alcohol y que se resumen en la Tabla 3. El cálculo de las tasas retributivas se efectúan de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984. (Un ejemplo de cálculo se presenta en el apéndice).

Los valores de FCR, FCI, FTR, FD y FAT hallados para cada uno de los tratamientos se observan en la Tabla 4. Se puede notar, que de los siete sistemas analizados, sólo tres de ellos logran una remoción

total y que los procesos anaeróbicos requieren o de un estudio más profundo para mejorar su eficiencia o de tratamientos adicionales, ya que su contribución a la remoción es muy baja. De otra parte, todos estos tratamientos requieren una inversión inicial muy alta (100-300% del costo de la planta), ello indica la importancia de tener en cuenta el tratamiento de residuos en un estudio de factibilidad técnica-económica para la instalación de una nueva industria y la necesidad de desarrollar tecnologías más económicas.

El tratamiento recomendado para este residuo de acuerdo con el análisis realizado y resumido en la Tabla 4, es el de evaporación. Una segunda alternativa puede ser la producción de proteína unicelular, ya que, a pesar de presentar una contaminación residual alta, los beneficios por subproductos la hacen competitiva.

Un factor de gran influencia en esta evaluación es la tasa retributiva. En nuestro país es muy baja comparada con la de otros países como Estados Unidos o Inglaterra donde es del orden de 0.02-0.06 U.S\$/Kg DQO (8) (10). Valores mayores podrán hacer que

Tabla 3. Cuadro de costos de capital y beneficios para siete sistemas de tratamiento de vinazas.

Método	1	2	3	4	5	6	7
COSTO PLANTA TRATAMIENTO	3000	6400	2400	8600	3500	3200	0000
COSTO TOTAL PLANTA	9000	12400	8400	14600	9500	9200	600
COSTOS ANUALES DE PRODUCCION (FIJOS, ELECTRICIDAD, VAPOR, MANTENIMIENTO, OPERACION Y QUIMICOS)							
COSTOS TOTALES BRUTOS	1143	1576	1115	2643	833	766	0000
VENTA SUBPRODUCTOS (CONCENTRADO, POTASA, LEVADURA, POTASA, VAPOR)							
ABONO	1260	1248	2160	2343	588	618	0000
RESIDUOS	0	0	12000DBO	0	15DBO	30%DQO	
					40%DQO		

Método 1: Evaporación (4)

Método 3: Proteína (4)

Método 5: Anaerobio-VASB (5)

método 7: Sin tratamiento (7)

* DBO ESTA EXPRESADO EN PPM Y LOS COSTOS EN MILES DE DOLARES

Método 2: Calcinación (4)

Método 4: Proteína y calcinación

Método 6: Anaerobio ANAMET (5)

Tabla 4. Análisis de los sistemas de tratamiento para vinazas.

Método	1	2	3	4	5	6	7
FQO	45	45	18	45	10	14	1
FCI	-14	-50	-6	-75	-20	-15	0
FTR	10	-13	25	5	-18	-12	-42000
FD	5	4	5	4	4	4	0
FAT	46	-14	42	-21	-24	-9	-42000

*Ver convención en la Tabla 3.

procesos como los anaeróbicos sean competitivos en relación con otros como proteína o evaporación.

CONCLUSIONES

El método propuesto permite tener en cuenta factores ecológicos y económicos en la evaluación de sistemas de tratamiento. Su aplicación a las vinazas de la industria alcohólica indica que la evaporación es el sistema más viable. Estudios técnicos sobre tratamientos anaeróbicos y un aumento de la tasa retributiva podrán hacer éstos sistemas competitivos.

APÉNDICE

Cálculo de la tasa retributiva (TO): De acuerdo con el Decreto 1594 en su artículo 143, en el caso de no usar sistema de tratamiento:

$TO = \text{carga combinada} * \text{factor de costo del programa de control} + \Sigma (\text{sustancia interés sanitario} * \text{factor costo del programa de control de la sustancia interés sanitario}).$

$SM_1 = \text{Factor de costo del programa de control por carga contaminante.}$

$SM_2 = \text{Factor de costo del programa de control por sustancias de interés sanitario.}$

Para este caso:

$\text{Carga combinada} = C.C = (2DBO + DQO)/3 + SS \text{ (Kg/día)}$

De acuerdo con CAICEDO y DUARTE (9): Para una planta de 80000 L de alcohol/día con 360 días de operación:

$$DQO: 86356 \text{ Kg/m}^3 = 86356 \text{ Kg/día}$$

$$DBO: 36388 \text{ Kg/m} = 36388 \text{ Kg/día}$$

$$S.S: 5490 \text{ Kg/m} = 5490 \text{ Kg/día}$$

$$\text{Vinaza: } 1000\text{m}^3/\text{día}$$

Los valores para el cálculo de la tasa retributiva

$$C.C: 58534 \text{ Kg/día}$$

$$SM_1: \text{U.S\$ } 0.0008/\text{Kg} \quad SM_2: \text{U.S\$ } 0.65/\text{Kg}$$

Debido a que las sustancias de interés sanitario indicadas en el artículo 74 del Decreto no son consideradas por la EPA (11) como factores en el caso de industrias de bebidas, este factor se considera despreciable para nuestro caso.

$$T.O: 16700 \text{ U.S\$}/\text{año}$$

$$TRT = (0 - 16700)/1 = -16700 \text{ U.S\$}/\text{año}$$

REFERENCIAS

1. AZAD S., Industrial Wastewater Management Handbook, McGraw-Hill, New York, 1976.
2. El TIEMPO, 12 de julio, 1992, 4C.
3. CAICEDO L. A., Tratamiento de Vinazas, Universidad Nacional (sin publicar).
4. MAIORELLA B., BLANCH W., WILKE C. Process Bioch., agosto, 1983.
5. LETTINGA G., et. al., Conference "Anaerobic Waste Water Treatment in Fix Film Reactors", Copenhagen, junio 1982.
6. SKOGMAN H., Process Bioch., enero, 1979.
7. BANCO MUNDIAL, Alcohol de Biomasa, New York, 1981.
8. ANDERSON G., Conferencia Planetario Distrital; Fundación Aire, Agua y Suelo, octubre, 1984.
9. CAICEDO L. A., DUARTE A., XIV Congreso de Ingeniería Química, Bogotá, 1984.
10. WEISBERG, E., Chem. Eng., 18, junio, 1973. 11. E.P.A., Handbook for Monitoring Industrial Wastewater, 1973.